

# 德國土壤復育法規與技術初探

林鎮洋<sup>1</sup> 郭玲惠<sup>2</sup> 郭振泰<sup>3</sup>

## 摘要

德國在過去十餘年全力整頓受污染的土地，成果相當豐碩，許多原先受污染的土地已經再生利用，近年來更因兩德統一，土壤復育的市場需求量激增，業者因而累積更多的經驗與投入更多的研發，使得該新興工業一片欣欣向榮。雖然德國至今仍無土壤復育法規，但因德國人堅定秉持「不乾淨的土地根本不容許變更與買賣」的基本信念，迫使土地所有者為了土地變更與買賣之便，只好先期投入污染整治費用，如此方才造就「污染土地、地主與土壤復育工業」三者間的良性循環。國內寸土寸金，若能使「土地炒作」與「土壤復育」亦成為一體的兩面，則不無可能創造「雙贏」的局面。本文旨在拋磚引玉，初步介紹了德國土壤復育法規與技術，希望對於落實我國本土性土壤復育工作有所助益。

關鍵字：土壤復育（soil remediation）、氣提法（venting system）、就地處理（in/situ treatment）

## 壹、引言

德國由於工業化起步甚早，加上兩次大戰期間盛極一時的軍火工業，使其境內普遍存在著受污染的土地，所幸過去十餘年來，全力投入土壤復育（soil remediation）工作，突破了許多技術上的瓶頸（譬如已不只侷限於傳統水力措施，而是輔以許多更經濟有效的理化與生物方法），近年來復因兩德統一，市場需求量激增，使得業者累積更多的經驗與投入更多的研發，如今，土壤復育工業儼然已成為德國環工界的新貴，不但創造了新的就業市場，亦解決棘手的環境污染問題，更能將此成熟技術輸出，賺取可觀的外匯，可謂一舉數得。但德國至今仍無土

---

1( 德國工學博士，台大土木工程系博士後研究

2( 德國法學博士，中興大學法律系副教授

3( 台大土木系教授

壤復育法規，業者遵循的標準是什麼？仰賴的技術有何特別？為何該專業仍能蔚為時尚？本文擬就這些疑點作初步探討，以為國內環保界之參考。

## 貳、法律基礎

如前所述，德國並沒有土壤復育法規，所以復育工程所要達成的標準必須經由各個相關環境法規確定，例如在水源區內就必須符合飲用水條例（德文簡稱 TrinkwV）的規定。一般而言，為保障公共安全（public safety），各邦政府都訂有維護秩序法（social peace law），規定最低限度的要求。任何人（或法人、或土地所有人）只要有破壞環境、危害他人健康的事實，主管機關即可依法處置之。各邦維護秩序法所處罰的對象，包含了破壞環境之行為人（offender）及該被破壞環境之佔有人（possessor），直至被處罰的對象洽請合格復育業者清除乾淨為止。在被認定「乾淨」以前，所有土地交易之相關行為必須停止。所謂達到「乾淨」的標準是指符合相關環保法規的規定，譬如廢棄物清理法（waste act, 德文簡稱 AbfG）、水源保護法（water resource act, 德文簡稱 WHG）、聯邦公害防治法（federal pollution prevention act, 德文簡稱 BImSchG）等；在此前提下，主管機關可依主客觀事實（包括可行性、科學性、政治性）裁定遵循標準（Appel et al., 1987），這些標準從法律角度來看，有以下三種可能：

### 一、門檻值及檢驗值

「門檻值」像一道基本防線，逾越「門檻值」將會引發劇烈或不明危害，所以於各法規中，將其視為是否必須進行「復育」之指標。「檢驗值」則比「門檻值」稍微嚴一點，若污染程度超過了所謂「檢驗值」標準，儘管還符合「門檻值」的要求，仍應作進一步之檢驗，始可決定是否需要進行復育工程。

### 二、環境標準

較「門檻值」及「檢驗值」嚴格者，是所謂的「環境標準」，也就是針對特定危害性物質於環境介質（水、空氣等）中，法律所允許的最大排放值。目前尚無有關土壤方面的規定。典型的例子如飲用水條例、食品衛生法（德文簡稱 BGA/YEBS）、作業安全法（德文簡稱 MAK）等的規定。

### 三、可容忍值

指在特定範圍內，由主管機關基於專業上與政治上的妥協，所制定的「可容忍值」標準。Appel 等人（1987）認為土壤的「可容忍值」標準，可比照污泥的相關規定制定。另一個普遍被人引用者為所謂的「荷蘭準則」（德文為Holland/Liste）；雖然荷蘭準則並非放諸四海皆可行，但他至少提供一個有科學依據的土壤環境標準，所以在德國也廣被應用。表一列出荷蘭準則對於土壤重金屬的有關規定（A, B, C 三級）。A 級被認定為無污染之虞，B 級尚需做進一步研究，C 級則需要進行復育工程了。這些規定的缺點是忽略了不同土壤間涵容能力的個別差異性，荷蘭因全國土壤的均質性頗高，所以尚能適用，其他國家若要直接引用，宜加審慎。

表一 荷蘭準則有關土壤重金屬的規定（單位：mg / kg乾土）

重金屬	A	B	C
砷 ( Arsenic )	20	30	50
鎘 ( Cadmium )	1	5	20
總鉻 ( Chromium )	100	250	800
銅 ( Copper )	50	100	500
鉛 ( Lead )	50	150	600
鎳 ( Nickel )	50	100	500
鋅 ( Zinc )	200	500	3000
氰化物 ( free Cyanid )	1	10	100
酚 ( Phenol )	0.02	1	10
苯 ( Benzene )	0.02	0.05	5
3,4 苯駢 ( 3,4 Benzyprren )	0.05	1	10
綠酚 ( Chlorphenol )	0.01	1	10
多氯聯苯 ( PCB )	0.05	1	10
油脂 ( mineral oil )	100	1000	5000

吾人另舉農藥為例來說明「環境標準」和「可容忍值」的異同（見表二）。其中作業安全法和飲用水標準屬於「環境標準」的規定；荷蘭A準則（水及土壤）及荷蘭C準則（水及土壤）則屬「可容忍值」的規定。從表二可以看出各個標準不盡相同，因此乃授權主管機關依權責認定。詳細的比較說明可參閱 DVWK 98 1991。

## 參、土壤復育技術

污染土地的復育必須針對污染物種類、土壤特性和傳輸途徑選定技術上有效及經濟上可行的方法。這些方法有的只是單純一種技術，有的是合數種技術於一身，有的是在場內（on/site）直接處理，有的則送到場外（off/site）再行處理，但基本上不外乎阻絕設施、挖除及就地處理（in/situ）三大類別。下面將簡單介紹其所涵蓋的方法，並針對污染物、地質、污染區域及復育要求等四項因子作有效性評估（見表三），以供污染整治之參考。

### 土壤復育技術種類：

#### 一、阻絕設施

1. 垂直不透水牆
2. 水平不透水鋪面
3. 基礎面鋪不透水層

#### 二、挖除

1. 熱處理
2. 物化法
  - (1) 固化
  - (2) 土壤淋洗

#### 三、就地處理

1. 水力措施
  - (1) 污染物溶於水中
  - (2) 污染物獨立一相
2. 氣提法（venting system）
3. 熱處理
4. 物化法
  - (1) 固化
  - (2) 土壤淋洗
  - (3) 電振法
5. 生物法
6. 其他新技術

表三 土壤復育技術評估一覽表

復育方法	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
評估因子															
1. 污染物															
無機性															
。固定型	佳	佳	佳	佳	差	可	可	差	差	差	可	可	可	差	差
。流動型	佳	佳	佳	可	差	可	差	差	佳	差	可	差	佳	差	差
有機性															
。揮發性															
。低吸附性	可	可	差	差	差	差	差	差	佳	佳	差	差	差	可	佳
。高吸附性，生物分解	可	可	可	差	佳	差	可	差	佳	可	差	可	差	可	可
。高吸附性，生物不分解	可	可	可	佳	佳	可	可	佳	差	可	差	可	差	佳	可
。LNAPL	可	可	可	差	佳	差	可	差	差	差	差	可	差	差	可
。DNAPL	可	可	可	可	佳	可	差	差	可	可	差	差	差	差	可
2. 地質															
鬆質土壤															
k <sub>f</sub> 小於 10 <sup>-5</sup> m/s :															
。非飽和層	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	差	佳	可	差	佳
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	差	差	可	可	差	差
k <sub>f</sub> 大於 10 <sup>-5</sup> m/s :															
。非飽和層	差	佳	差	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	可	佳
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	佳	佳	差
密質土壤															
。非飽和層	差	佳	差	差	差	差	差	差	可	可	可	差	差	差	可
。飽和層	可	佳	差	差	差	差	差	差	可	差	可	差	差	可	差
高度非均勻性土壤															
。非飽和層	差	佳	差	佳	佳	佳	佳	佳	差	可	差	差	差	可	可
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	差	差	差	差	可	差
3. 污染區域															
水平面															
。大片範圍	差	差	差	差	差	差	差	差	佳	佳	差	差	差	可	差
。有限區域	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳
鉛直面															
。深層	可	可	差	差	差	差	差	差	佳	可	可	差	差	佳	差
。淺層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	佳	佳	佳	佳
4. 要求															
。剩餘污染濃度低	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	可	佳	差	差	差	差	差
。除污時間短	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	可	可	可	差	差	可
。長期性解決問題	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	佳	佳	佳	佳
。成果掌握性	可	可	可	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	可	可	可	可
5. 目前技術狀況	用	用	實	用	用	模	用	用	用	用	模	模	模	用	模

A1：垂直不透水牆  
 A2：水平不透水鋪面  
 A3：基礎面鋪不透水層

B1：挖除，掩埋  
 B2：挖除，熱處理  
 B3：挖除，化學處理  
 B4：挖除，土壤淋洗  
 B5：挖除，生物法

c1：就地處理，水力措施  
 c2：就地處理，氣提法  
 c3：就地處理，化學處理  
 c4：就地處理，土壤淋洗  
 c5：就地處理，電振法  
 c6：就地處理，生物法

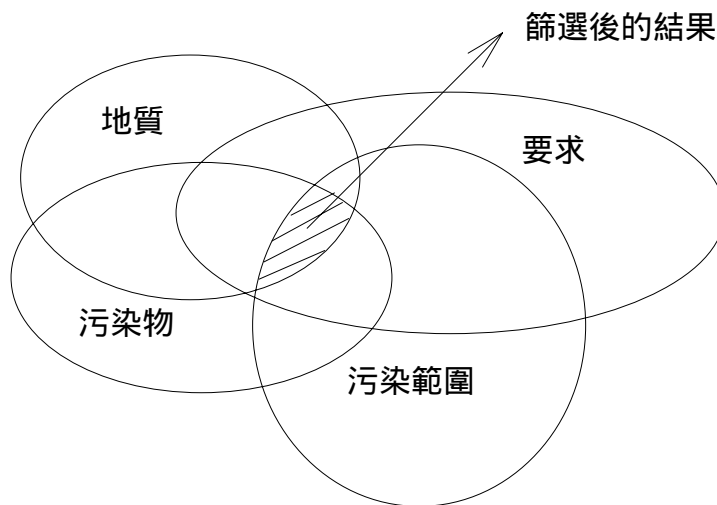
用：已商業化          模：模型場（pilot）階段          實：實驗室階段

為便於說明如何使用該評估表，茲舉一範例如后：

污染物           ：揮發性碳氫化合物  
地質              ：鬆質土壤， $k_f$  大於  $10^{-4}$  m/s，含非飽和層及飽和層  
污染區域        ：屬淺層且大範圍污染型  
復育要求        ：剩餘污染濃度要低且能長期性解決問題

根據以上的條件，複評各個可能的復育方法如下：

- 因污染物為揮發性碳氫化合物，所以以就地處理之水力措施、氣提法及熱處理法最好
- 因地質上屬鬆質土壤，所以大部分的復育方法基本上都能適用
- 因污染範圍太大，所以阻絕設施法及挖除法都不經濟
- 為滿足上述兩項基本復育要求，所以阻絕設施法便毋需考慮



圖一 過濾評選示意圖

「篩選式」的基本觀念表如圖一及表四；該範例的評估結果，地下水復育以「就地水力措施」最佳，「就地生物法」則為次佳的選擇，而非飽和層以「氣提法」為宜。當然，技術可行性（參考表三）和經濟因素亦應列入考量，表五列出上述復育技術的基本單價，以供參考。

表四 評估範例

復育方法	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
評估因子															
1. 污染物															
無機性															
。固定型	佳	佳	佳	佳	差	可	可	差	差	差	可	可	可	差	差
。流動型	佳	佳	佳	可	差	可	差	差	佳	差	可	差	佳	差	差
有機性															
。揮發性															
。低吸附性	可	可	差	差	差	差	差	差	佳	佳	差	差	差	可	佳
。高吸附性，生物分解	可	可	可	差	佳	差	可	差	佳	可	差	可	差	可	可
。高吸附性，生物不分解	可	可	可	佳	佳	可	可	佳	差	可	差	可	差	佳	可
。LNAPL	可	可	可	差	佳	可	可	差	差	可	差	可	差	差	佳
。DNAPL	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	差	差	差	差	可
2. 地質															
鬆質土壤															
k <sub>f</sub> 小於 10 <sup>-5</sup> m/s :															
。非飽和層	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	差	佳	可	差	佳
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	差	差	可	可	差	差
k <sub>f</sub> 大於 10 <sup>-5</sup> m/s :															
。非飽和層	差	佳	差	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	可	佳
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	佳	佳	差
密質土壤															
。非飽和層	差	佳	差	差	差	差	差	差	可	可	可	差	差	差	可
。飽和層	可	佳	差	差	差	差	差	差	可	差	可	差	差	可	差
高度非均勻性土壤															
。非飽和層	差	佳	差	佳	佳	佳	佳	佳	差	可	差	差	差	可	可
。飽和層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	差	差	差	差	可	差
3. 污染區域															
水平面															
。大片範圍	差	差	差	差	差	差	差	差	佳	佳	差	差	差	可	差
。有限區域	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳
鉛直面															
。深層	可	可	差	差	差	差	差	差	佳	可	可	差	差	佳	差
。淺層	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	可	佳	佳	佳	佳
4. 要求															
。剩餘污染濃度低	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	可	佳	差	差	差	差	差
。除污時間短	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	可	可	可	可	差	可
。長期性解決問題	差	差	差	佳	佳	佳	佳	佳	佳	佳	差	佳	佳	佳	佳
。成果掌握性	可	可	可	佳	佳	佳	佳	佳	可	可	可	可	可	可	可
5. 目前技術狀況	用	用	實	用	用	模	用	用	用	用	模	模	模	用	模



表 五 單 價 表

(DM : 德國馬克)

代碼	復 育 方 法	估 價	備 註
A1	垂直不透水牆	單層式流泥牆：150 / 350 DM/m <sup>2</sup> 雙層式流泥牆：400 DM/m <sup>2</sup> 中間夾人造層：90 DM/m <sup>2</sup> 鋼板牆（混和流泥）：20 DM/m <sup>2</sup> 鋼板牆：50 DM/m <sup>2</sup> 鑲嵌式：60 DM/m <sup>2</sup> 噴注式：750 DM/m <sup>2</sup>	根據 Hochtief 公司（1990） 同上 同上 同上 同上 同上 同上
A2	水平不透水鋪面	礦物性材質：80 / 100 DM/m <sup>2</sup> 混合礦物性材質：110 / 130 DM/m <sup>2</sup>	根據 Molitor 公司（1991） 同上
A3	基礎面鋪不透水層	-	
B1	挖除，熱處理	直接焚化：125 / 180 DM/t 旋轉式鍋爐：250 / 300 DM/t 間接焚化：200 / 500 DM/t	根據 Stupp 公司（1988） 同上 同上
B2	挖除，固化	80 / 200 DM/t	根據 Gerschler 公司（1990）
B3	挖除，土壤淋洗	130 / 230 DM/t	根據 ContraCon 公司（1989）
B4	挖除，生物法	60 / 230 DM/t 150 / 300 DM/t 200 / 300 DM/t	根據 ContraCon 公司（1990） 根據 Laub 公司（1989） 根據 Umweltsch. N.（1990）
c1	就地，水力措施	-	污染物可溶於水
c2	就地，水力措施	-	污染物不溶於水
c3	就地，氣提法	-	
c4	就地，熱處理	-	

c5	就地，固化	150 / 500 DM/m <sup>3</sup>	根據 Stupp 公司 (1988)
c6	就地，土壤淋洗	500 DM/m <sup>3</sup>	根據 Balthaus 公司 (1988)
c7	就地，電振法	-	
c8	就地，生物法	-	

## 肆、引進國內之建議

土地污染不易察覺，即使已危害人體健康，亦難在短期間內作明確的科學鑑定，所以在我們這種滿目瘡痍的環境裡（包括水污染、空氣污染等），土壤污染整治的優先性必然不高。筆者以為，若有心要整治受污染的土地，技術上的困難尚且容易克服，難的是如何創造一個「利多」的環境，讓土地投資（投機？）者甘於先整治土地污染而後才創造利潤。也就是說，不乾淨的土地根本不容許變更與買賣。因為唯有結合「土地炒作」與「土壤復育」，才能使大家樂於保有一片「淨土」。若能讓「土地污染度」藉由市場機能直接「價格化」，則只要遊戲規則明確（例如土地法、土壤污染防治法），並且政府堅守裁判角色，則土地、地主、土壤復育專業間必能形成良性循環，受惠者毋疑的必屬全體國民。德國在過去十餘年來，大力整頓受傷的土地，成果斐然，本文拋磚引玉，初步介紹了德國土壤復育法規與技術，希望土壤復育專業能早日成為國內的明星工業。

## 伍、參考文獻

1. DVWK 98 1991 Sanierungsverfahren für Grundwasserschadensfälle und Altlasten - Anwendbarkeit und Beurteilung, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, Germanz.
2. Fjste, W. 1990 Altlasten - Die Zeitbombe im Boden tickt, Fischer Taschenbuch Verlag GmbH, Frankfurt am Main, Germanz.
3. Brandt, E. 1993 Altlasten : Bewertung, Sanierung, Finanzierung, 3. Auflage, Eberhard Blottner Verlag, Taunusstein, Germanz.
4. Weber, H. H. 1990 Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germanz.
5. Fetter, C. W. 1993 Contaminant Hydrogeology, Macmillan Publishing Company, U.S.A.

6. 台大農化系編印（1990），第二屆土壤污染防治研討會論文集，台北市。
7. 中興土壤系編印（1992），第三屆土壤污染防治研討會論文集，台中市。
8. 工研院能資所編印（1993），第四屆土壤污染防治研討會論文集，台北市。
9. 車明道（1993），土壤污復育技術介紹及有效性評估，能源、資源與環境，工研院能資所出版，Vol. 6, No. 3, 1993。